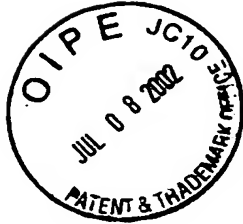


#5



*priority  
checked  
9-1302*

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT**

**Aktenzeichen:** 101 10 617.3

**Anmeldetag:** 6. März 2001

**Anmelder/Inhaber:** CeramTec AG Innovative Ceramic Engineering,  
Plochingen/DE

**Bezeichnung:** Rissunterdrückung bei piezokeramischen  
Vielschichtaktoren

**IPC:** H 01 L, H 02 N

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 4. März 2002  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Wallner

## Rissunterdrückung bei piezokeramischen Vielschichtaktoren

Piezokeramische Vielschichtaktoren (Fig. 1) bestehen aus gestapelten dünnen Schichten piezoelektrisch aktiven Materials (2), z. B. Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), mit dazwischen angeordneten leitfähigen Innenelektroden (7), die alternierend an die Aktoroberfläche geführt werden. Außenelektroden (3, 4) verbinden diese Innenelektroden. Dadurch werden die Innenelektroden elektrisch parallel geschaltet und zu zwei Gruppen zusammengefasst, die die beiden Anschlusspole des Aktors darstellen. Legt man eine elektrische Spannung an die Anschlusspole, so wird diese auf alle Innenelektroden parallel übertragen und verursacht ein elektrisches Feld in allen Schichten aktiven Materials, das sich dadurch mechanisch verformt. Die Summe aller dieser mechanischen Verformungen steht an den Endflächen des Aktors als nutzbare Dehnung (6) und/oder Kraft zur Verfügung.

### Stand der Technik:

- 15 Piezokeramische Vielschichtaktoren werden nach dem Stand der Technik als Monolithen ausgeführt, das heißt, das aktive Material wird als sogenannte Grün-Folie vor dem Sintern durch ein Siebdruckverfahren mit Innenelektroden versehen, zu Aktorstapeln verpresst, pyrolysiert und dann gesintert, wodurch der monolithische Aktor entsteht.
- 20 Auf den Aktorstapel (1) wird im Bereich der herausgeführten Innenelektroden (7) z. B. durch galvanische Verfahren oder Siebdruck von Metallpaste eine Grundmetallisierung (3) aufgebracht. Diese Grundmetallisierung wird verstärkt durch Aufbringen eines metallischen Werkstoffes (4) z. B. durch Anlöten eines strukturierten Bleches oder eines Drahtnetzes. An diese verstärkte Schicht wird der elektrische Anschlussdraht (5) gelötet (siehe Figur 2 und 3).
- 25

- 2 -

Der Aufbau und die Herstellung derartiger Aktoren und Außenelektroden wird ausführlich beschrieben z. B. in DE 33 30538 A1, DE 40 36 287 C2, US 5 281 885, US 4 845 399, US 5 406 164 und JP 07-226541 A.

Derart aufgebaute Aktoren weisen einen gravierenden Nachteil auf: Während  
5 des Betriebes wirken auf den Isolierbereich (11) der unter der Grundmetallisierung (3) liegt, starke Zugspannungen. Da dieser Bereich zusammen mit der Grundmetallisierung und der Lotschicht (8) eine homogene Einheit bildet, versagt diese beim Überschreiten der Zugfestigkeit des schwächsten Gliedes, es bildet sich ein Riss. Die Risse laufen gewöhnlich von der spröden und wenig  
10 zugfesten Grundmetallisierung in die Isolierschicht, und werden dort von Bereichen mit hohen Zugspannungen eingefangen (Elektroden spitze 9), oder sie beginnen in den Bereichen maximaler Zugspannung (9) und laufen Richtung Grundmetallisierung. Mehrere dieser typischen Risse (13,14) sind in Fig. 3 dargestellt.

15 Die Rissausbreitung (13) entlang einer die Grundmetallisierung berührenden Innenelektrode (10) ist als relativ unkritisch einzustufen, da sie die Funktion des Aktors nicht beeinträchtigt. Risse (14), die unkontrolliert durch die Isolierzone (11) laufen sind dagegen sehr kritisch, da sie den Isolationsabstand verringern und die

20 Problemlösungen werden zum Beispiel in den Patentanmeldungen DE198 60 001 A1, DE394 06 19 A1, DE196 05 214 A1 und anderen beschrieben. Es wird dort vorgeschlagen, den Bereich zwischen einer nicht die Grundmetallisierung berührenden Elektrode (12) und der Grundmetallisierung mit einem Füllmaterial geringer Zugfestigkeit, oder einem Hohlraum zu versehen. Die wesentlichen  
25 Nachteile dieser Vorgehensweise sind darin zusehen, dass das Füllmaterial mit einem zusätzlichen, komplexen Verfahrensschritt aufgebracht werden muss, das Füllmaterial unvermeidbar die Eigenschaften der Aktors negativ beeinflusst, und im Falle der eingebrachten Hohlräume diese in einem weiteren Verfahrensschritt

vor dem Aufbringen der Grundmetallisierung wieder geschlossen werden müssen.

5 Eine andere Problemlösung wird in DE199 28 178 A1 vorgeschlagen. Hier wird der monolithische Aufbau in kleine Teilbereiche zerlegt und alternierend mit in-aktiven, elektrodenfreien Bereichen wieder aufgebaut. Hierbei soll innerhalb eines aktiven Bereiches die maximal mögliche Zugspannung unterhalb des zur Rissbildung notwendigen Wertes bleiben. Das Verfahren ist fertigungstechnisch schwierig und führt nicht zur notwendigen Reduktion der Spannungen im Bereich 11.

10 **Beschreibung der Erfindung:**

Es wird vorgeschlagen, den gesamten passiven Isolierbereich (11) einschließlich der Grundmetallisierung in geeigneter Weise regelmäßig mechanisch zu unterbrechen. Dadurch wird vermieden, dass sich die Zugspannungen in diesem Bereich zu einem Wert aufsummieren, der die Bruchfestigkeit des Aktormaterials  
15 übersteigt.

Besonders vorteilhaft ist es, den Arbeitsgang des Unterbrechens bereits im ungesinterten Zustand an den Aktoren mittels spanabhebenden Formgebungsverfahren oder durch Schleifen vorzunehmen. Die anschließend beim Sintern entstehende Sinterhaut isoliert die Trennstellen zuverlässig gegen elektrische Über-  
20 schläge und Feuchtigkeit.

**Vorteil der Erfindung:**

Aktoren mit geeignet unterbrochenem Isolierbereich Grundmetallisierung zeigen keinerlei Rissbildung.

### Beschreibung des Verfahrens:

Eine niedrig sinternde Piezokeramik, z. B. SKN53 nach DE 198 40 488 A1 wird mit einem organischen Bindersystem als 125 µm dicke Folie präpariert. Auf diese Folie wird Innenelektrodenpaste aus Silber-Palladium Pulver in Gewichtsverhältnis 70/30 und einem geeigneten Bindersystem mittels Siebdruck aufgebracht. Eine Vielzahl derartiger Folien wird gestapelt und zu einem Laminat verpresst. Das Laminat wird zu einzelnen, stabförmigen Aktoren zertrennt.

Erfindungsgemäß werden diese Einzelaktoren mit einem spanabhebenden Verfahren, z.B. mit einem Scheibenfräser, auf den zu kontaktierenden Seiten unter einem geeigneten Winkel soweit eingesägt, dass die inaktive Isolierzonen (11) völlig durchtrennt werden. Die Trennschnitte (16) werden in regelmäßigem Abstand wiederholt.

Die Breite des Trennschnittes (16), der Abstand zwischen zwei Trennschnitten (17) und der Winkel (18) der Trennschnitte gegenüber der Aktorachse müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass nicht mehr als eine bestimmte Anzahl von Innenelektroden zwischen zwei Trennschnitten an die Aktoroberfläche tritt. Diese maximale Anzahl ist abhängig von der spezifischen Dehnung des Aktors im Betrieb und der Festigkeit des Aktormaterials. Ein typischer, sicherer Wert liegt bei etwa 5 Elektrodenlagen oder ca. 1 mm. Wird die Anzahl zu hoch gewählt, so addieren sich die Zugspannungen von Elektrode zu Elektrode auf und überschreiten den für die Rissbildung kritischen Wert. Wählt man als Schnittwinkel z. B. 45° so ergeben sich als günstige Parameter ein Schnittabstand und eine Schnittbreite von 0,7 mm ( $1\text{mm}/\sqrt{2}$ ).

Die Aktoren werden anschließend bei ca. 400°C pyrolysiert und bei ca. 1100 °C gesintert.

Die Schnitte können auch nach dem Sintern der Aktoren z. B. durch einen Schleifvorgang eingebracht werden. Dies erfordert aber einen vergleichsweise hohen maschinellen Aufwand. Außerdem besteht die Gefahr, dass die Schnitte verschmiertes Metall aus den Innenelektroden enthalten, was zu Kurzschlüssen führen kann. Zudem müssen die Schnitte mit z. B. einem Polymermaterial nachträglich isoliert werden. Die Wirkung dieser Vorgehensweise ist jedoch identisch mit der oben genannten. Derart behandelte Aktoren bekommen keine Risse im Betrieb.

Auf die stehengebliebenen Kontaktierbereiche wird nun mittels eines Druckverfahrens die Grundmetallisierung aus Silber-Einbrennpaste aufgebracht. Nach dem Einbrennen der Grundmetallisierung werden die Außenelektroden aus Metalldraht-Netz aufgelötet.

Die Aktoren können nun polarisiert und elektrisch gemessen werden. Das gesamte Vorgehen mit Ausnahme der erfindungsgemäßen Teile ist ausführlich in Patenten und der Literatur beschrieben.

### **Beschreibung der Zeichnungen:**

Figur 1 bis 3 stellen den Stand der Technik dar.

Figur 1 zeigt schematisch den Aufbau eines monolithischen Vielschichtaktors.

Figur 2 zeigt einen Ausschnitt aus diesem Aktor mit weiteren Details

Figur 3 zeigt den selben Ausschnitt mit den typischen Rissen, die sich nach ca.  $10^6$  Belastungszyklen einstellen.

Figur 4 und 5 zeigen je die Draufsicht auf eine erfindungsgemäß unterbrochene Isolierzona

### Ausführungsbeispiele: (1 - 5)

1. Wie oben ausgeführt werden ungesinterte Aktorgrundkörper der Abmessung 12,50 x 12,50 mm<sup>2</sup> (Grundfläche) und 37,50 mm Länge präpariert. Die Dicke einer Keramikeinzellage 2 beträgt 125 µm, die Dicke einer Innenmetallisierungsschicht 3 µm. Diese Ausführungsvariante dient als Referenzmuster und stellt den Stand der Technik dar.
2. Wie oben ausgeführt werden ungesinterte Aktorgrundkörper der Abmessung 12,50 x 12,50 mm<sup>2</sup> (Grundfläche) und 37,50 mm Länge präpariert. Die Dicke einer Keramikeinzellage 2 beträgt 125 µm, die Dicke einer Innenmetallisierungsschicht 3 µm. Die Aktorgrundkörper werden auf den zu kontaktierenden Seiten mit einem Scheibenfräser mit 0,7 mm Schnittbreite unter einem Winkel von 45° zur Aktorlängsachse in regelmäßigen Abständen eingesägt. Die Schnitttiefe entspricht der Dicke der Isolierzone (11) (0,5mm). Der Abstand zum nächsten Schnitt beträgt ebenfalls 0,7 mm.
3. Wie oben ausgeführt werden ungesinterte Aktorgrundkörper der Abmessung 12,50 x 12,50 mm<sup>2</sup> (Grundfläche) und 37,50 mm Länge präpariert. Die Dicke einer Keramikeinzellage 2 beträgt 125 µm, die Dicke einer Innenmetallisierungsschicht 3 µm. Die Aktorgrundkörper werden auf den zu kontaktierenden Seiten mit einem Scheibenfräser mit 0,2 mm Schnittbreite unter einem Winkel von 90° zur Aktorlängsachse in regelmäßigen Abständen eingesägt. Die Schnitttiefe entspricht der Dicke der Isolierzone (11) (0,5mm). Der Abstand zum nächsten Schnitt beträgt 1,0 mm.
4. Wie oben ausgeführt werden aus einem Laminat ungesinterte Aktor-Riegel der Abmessung 100,0 x 12,50 mm<sup>2</sup> (Grundfläche) und 37,50 mm Länge präpariert. Die Dicke einer Keramikeinzellage 2 beträgt 125 µm, die Dicke einer Innenmetallisierungsschicht 3 µm. Die Aktor-Riegel werden auf den zu kontaktierenden Seiten mit einem Scheibenfräser mit 0,7 mm Schnittbreite unter

einem Winkel von 45° zur Aktorlängsachse in regelmäßigen Abständen eingesägt. Die Schnitttiefe entspricht der Dicke der Isolierzone (11) (0,5mm). Der Abstand zum nächsten Schnitt beträgt ebenfalls 0,7 mm. Anschließend werden die Aktor-Riegel zu einzelnen, stabförmigen Aktorgrundkörpern zertrennt.

Die Aktorgrundkörper der obigen Ausführungsbeispiele werden anschließend bei ca. 400°C pyrolysiert und bei ca. 1100 °C gesintert.

5. Wie oben ausgeführt werden ungesinterte Aktorgrundkörper der Abmessung 12,50 x 12,50 mm<sup>2</sup> (Grundfläche) und 37,50 mm Länge präpariert. Die Dicke einer Keramikeinzellage 2 beträgt 125 µm, die Dicke einer Innenmetallisierungsschicht 3 µm. Die Aktorgrundkörper werden pyrolysiert und gesintert. Anschließend werden mit einer Diamantsäge auf den zu kontaktierenden Seiten Schnitte mit 0,2 mm Schnittbreite unter einem Winkel von 45° zur Aktorlängsachse in regelmäßigen Abständen eingesägt. Die Schnitttiefe entspricht der Dicke der Isolierzone (11) (0,4 mm). Der Abstand zum nächsten Schnitt beträgt 0,6 mm. Nach sorgfältiger Reinigung werden die Schnitte mit einem Silikonharz gefüllt. Das Harz wird bei 140°C ausgehärtet.

Die Kontaktseiten und die Stirnflächen der Aktoren aus den obigen Ausführungsbeispielen werden durch ein Schleifverfahren bearbeitet. Auf den restlichen Seiten kann die Sinterhaut verbleiben

Auf die fünf Varianten werden nun mit einem geeigneten Prozess die Außen Elektroden (4) aus Drahtnetz aufgelötet. Als Netzmaterial wird ein im thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Keramik angepasstes Material (FeNi36) verwendet, der Drahtdurchmesser beträgt 100 µm, die Maschenweite 200 µm. Das Netz ist galvanisch vorbehandelt (verkupfert) um die Lötbarkeit zu garantieren. Als Lot wird SnAg4 verwendet. Die Lötzeit beträgt 2 Minuten bei 240 °C.



Die Aktoren werden nun gereinigt und mit einer geeigneten Lackierung isoliert. Nach dem Anlöten von Anschlussdrähten (5) an die Elektrodenetze (4) werden die Aktoren in Prüfraumen mit 2000 N vorgespannt und mit einem Trapezsignal angesteuert. Dabei wird die Ansteuerspannung in 100 µs von 0 V auf 200 V angehoben, 1 ms auf 200 V gehalten, und dann in 100 µs auf 0 V erniedrigt. Die Wiederholfrequenz ist 200 Hz. Die Aktoren erreichen dabei Betriebstemperaturen von 150 - 160 °C.

Die Variante 1 zeigt bereits bei  $10^6$  Zyklen deutliche und starke Rissbildung. Die Risse durchtrennen die Isolierzone (11) in beliebigen Richtungen, Risse entlang der Innenelektroden (10) sind eher selten.

Die Varianten 2 bis 5 zeigen nahezu identisches Verhalten, das sich von Variante 1 deutlich unterscheidet. Auch nach  $10^8$  Zyklen treten in den Aktoren keine Risse auf.

### Patentansprüche

1. Piezokeramischer Vielschichtaktor mit vollständig unterbrochener Isolierzzone, dadurch gekennzeichnet, dass die Unterbrechungen durch ein mechanisches Formgebungsverfahren in den ungesinterten Aktorgrundkörper  
5 eingebracht werden.
2. Piezokeramischer Vielschichtaktor mit vollständig unterbrochener Isolierzzone, dadurch gekennzeichnet, dass die Unterbrechungen durch ein mechanisches Formgebungsverfahren in den gesinterten Aktorgrundkörper eingebracht werden.
- 10 3. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwei Serien von Unterbrechungen, die sich überkreuzen, in die Isolierzzone eingebracht werden.
4. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Unterbrechungen einen Winkel von  $10^\circ$  bis  $90^\circ$   
15 zur Aktorlängsachse aufweisen.
5. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Unterbrechungen vorzugsweise einen Winkel von  $30^\circ$  bis  $50^\circ$  oder  $90^\circ$  zur Aktorlängsachse aufweisen.
6. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch  
20 gekennzeichnet, dass die Unterbrechungen in einem Abstand von 0,2 bis 10 mm voneinander angebracht sind.
7. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Unterbrechungen vorzugsweise in einem Abstand von 0,8 bis 1,2 mm voneinander angebracht sind.

- 10 -

8. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Unterbrechungen eine Breite von 0,2 bis 2 mm haben.
9. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Unterbrechungen eine Breite von 0,2 bis 0,7 mm haben.
10. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Formgebungsverfahren Fräsen, Sägen oder Schleifen eingesetzt wird.
- 10 11. Piezokeramischer Vielschichtaktor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass als Formgebungsverfahren Schleifen eingesetzt wird.

Fig. 1

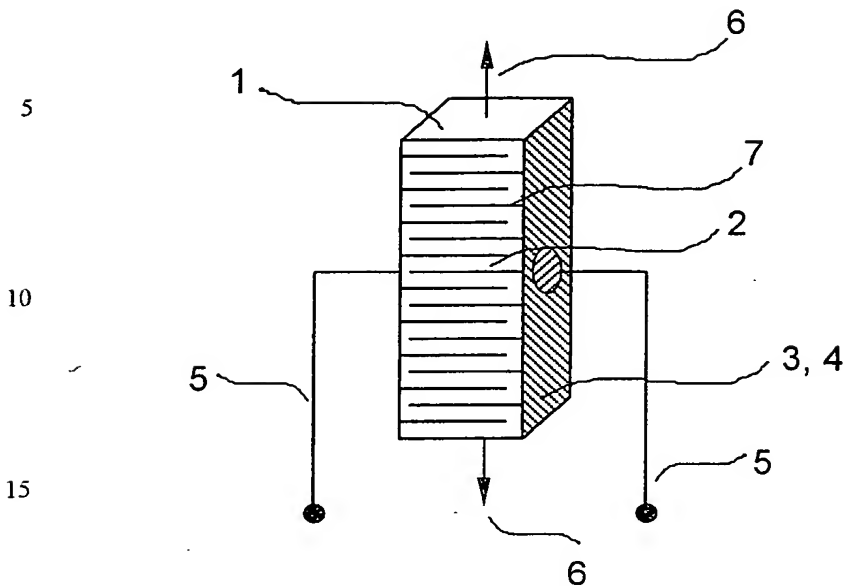


Fig. 2

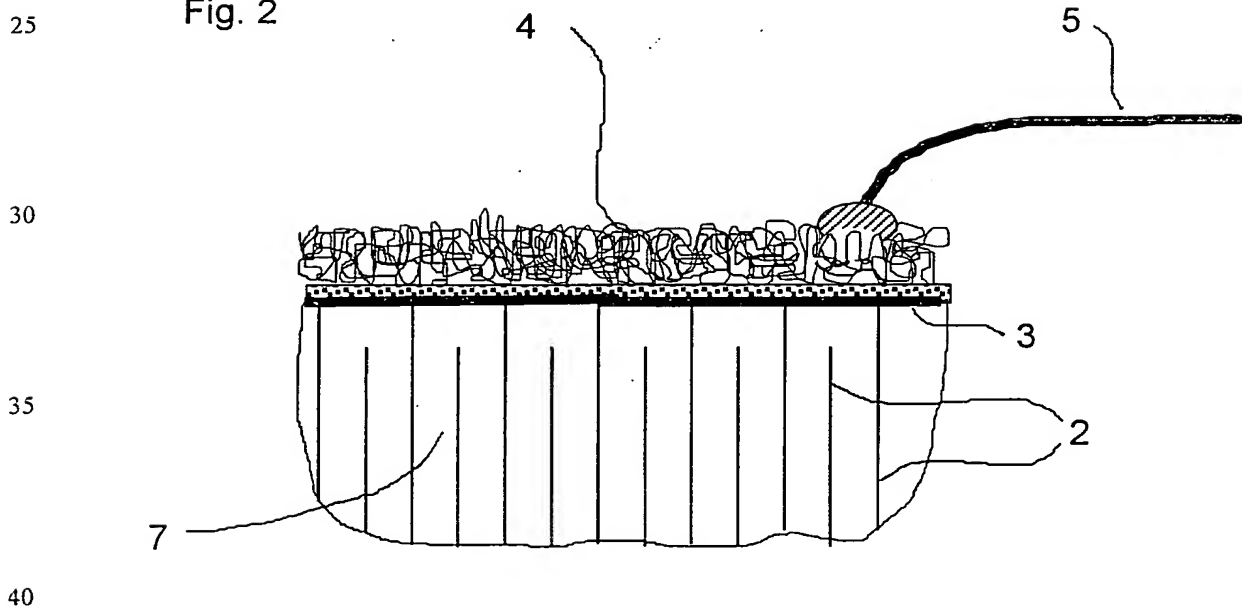


Fig. 3

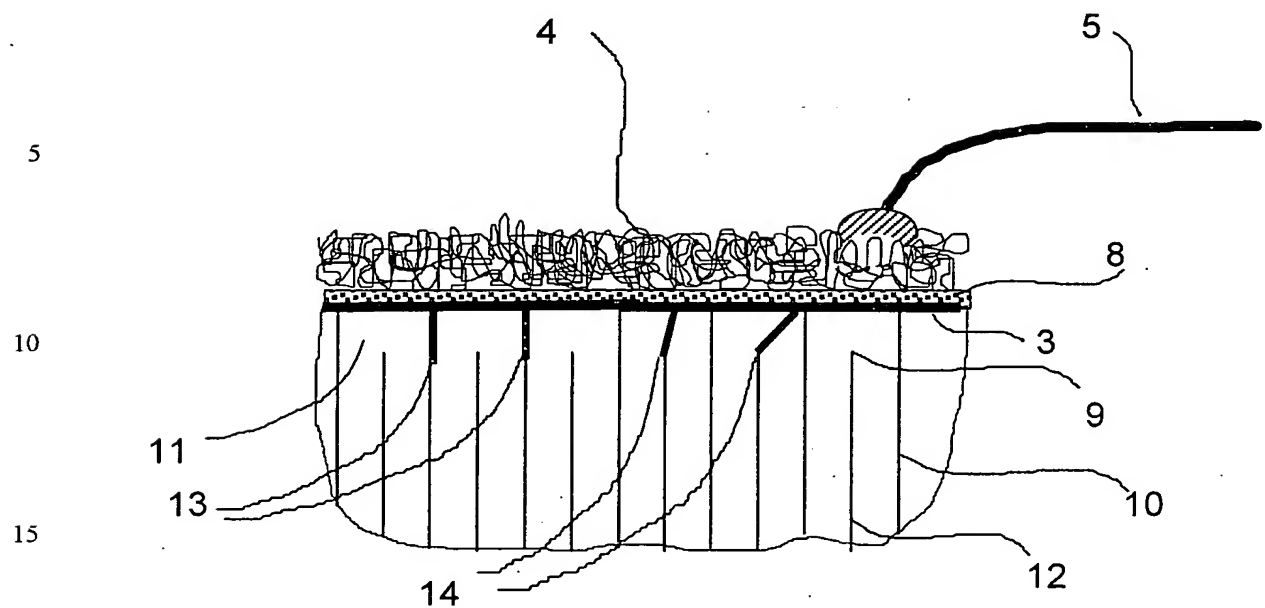


Fig. 4

Fig. 5

